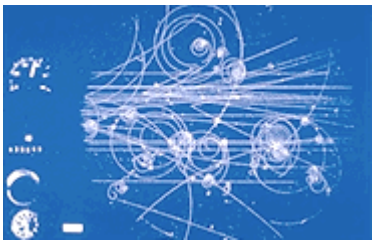
UNIVERSETS BYGGESTEN

En historie om kvantemekanikken – fra Niels Bohr til moderne højenergifysik



Noter til UNF Foredrag – 23. April 2002 – Odense

© 2002 – P. Z. Skands

Indhold

1 Før Kvanterne Kom **3**

2 Niels Bohr og Kvanterne **13**

3 Kvanterne bliver relativistiske **23**

4 Den Moderne Partikelfysik **27**

5 De Store Eksperimenter **33**

6 Fremtidens Profeter **37**

Kapitel 1

Før Kvanterne Kom

Problemet med Regnbuen. Historien om kvantemekanikken tager sin spæde begyndelse i 1700-tallets England, en tid, hvor Newtons fysik var solidt og urokkeligt etableret, hvor Plancks lyskvanter og Bohrs atommodel stadig var mere end 200 år borte. Og dog, godt tredive år efter Newtons død og et par år før opfindelsen af det første dampdrevne køretøj, gjorde man en opdagelse, hvis forklaring først skulle komme for dagen århundreder senere.

Den engelske fysiker William Wollaston var interesseret i Newtons eksperimenter med lys og prismer. Han var specielt optaget af, hvorledes Solens lys blev brudt, og i 1768, i denne vor nærmeste stjernes lys, så han noget, der overraskede ham dybt. Regnbuen var ikke en glidende overgang mellem røde, gule, grønne og blå farver. Der var enkelte farver, der simpelthen manglede, i alt så han syv fine sorte linier i regnbuen.

Godt halvtreds år efter Wollastons opdagelse katalogiserede den tyske optiker, Joseph von Fraunhofer, hvilke bølgelængder (farver), der "mangler" i Solens spektrum. Siden Wollastons tid var de eksperimentelle metoder blevet forbedret i en sådan grad, at Fraunhofer kunne se omkring 500 linier i Solens spektrum. Disse er siden blevet kaldt de *Fraunhoferske linier*. Han bemærker, at en af linierne har nøjagtigt samme farve som det gule lys, man får ved at strø salt på en flamme. Vi ved i dag, at linien

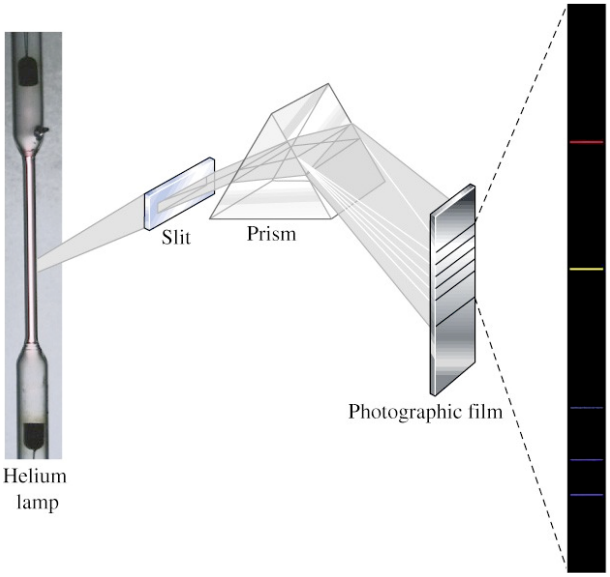
Figur 1.1: Kontinuert spektrum og ekspempel på absorptionsspektrum.

skyldes grundstoffet Natrium, der indgår i almindeligt køkkensalt og som findes i Solens atmosfære. Fraunhofer selv gjorde ikke meget ud af denne opdagelse, selvom den i dag kan ses som den første direkte indikation af, at stjernerne og materien i himmelrummet var gjort af samme stof som Jorden.

Man begyndte nu at katalogisere linierne i spektrene af alle slags stoffer, og en ny videnskab var blevet født, *spektroskopien*. Hvert grundstof viste sig at have sit eget tydelige fingeraftryk i form af bestemte linier ved bestemte bølgelængder. Denne konklusion er uhyre vigtig. Den er grunden til, at kemiske stoffer har forskellige farver, afhængig af, hvilke atomer, de er dannet af og hvilke forbindelser, de indgår i. Disse "fingeraftryk i lys" er også den eneste grund til, at vi i dag kan forske i, hvad fjerne stjerner består af og i hvordan deres atmosfærer ser ud.

Men selvom liniernes positioner og profiler var kendte for en stor mængde stoffer, manglede man stadig en teori, der kunne forklare, hvordan de opstod.

Ved 100-året for Wollastons opdagelse af de mørke linier i Solens spektrum skulle man, paradoksalt nok, opdage, at Solen dog alligevel ikke bestod af det samme som Jorden. Under en Solformørkelse i 1868 så man en helt ny linie i spektret fra Solens øvre overflade. Man konkluderede, at linien måtte skyldes et endnu på Jorden ukendt grundstof, og man gav dette "Solstof" navnet *Helium* (gr. *Helios* = Sol). Først et kvart



Figur 1.2: Spektret af Helium (fra en glødende Helium-gas) optaget på fotografisk film. Et såkaldt emissions- eller liniespektrum fremstår.

århundrede senere, i 1895, blev stoffet også fundet på Jorden.

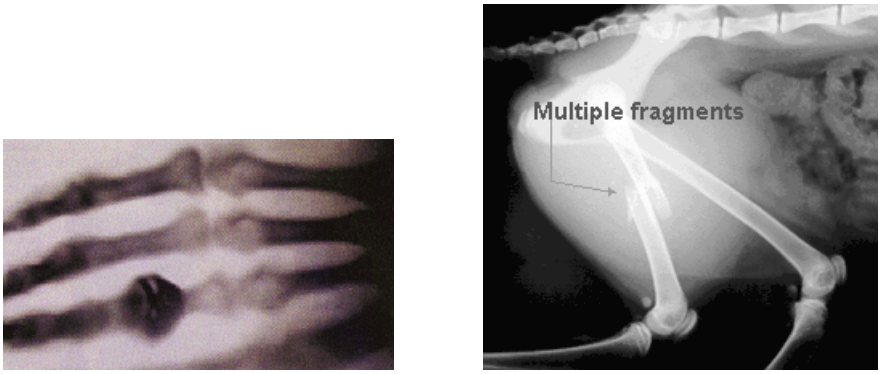
Og med året 1895 må vi skifte vor historie. For selvom oprindelsen til de Fraunhoferske linier stod som et mysterium, var det ikke dem, der for alvor satte gang i udviklingen af kvantemekanikken. Det radikale brud, som kvantemekanikken repræsenterer med hensyn til Newtons klassiske fysik, krævede langt flere og langt mere utrolige opdagelser, før mennesket blev i stand til at skabe den.

X-strålerne.

> Akademiet har tildelt Nobel Prisen i fysik til Wilhelm Conrad Röntgen, professor ved Münchens Universitet, for den opdagelse til hvilken hans navn for altid vil være knyttet: opdagelsen af de såkaldte Röntgen stråler, eller som han selv kaldte dem, X-stråler. Disse er, som vi ved, en ny form for energi og har fået navnet "stråler" da de bevæger sig i rette linier ligesom lys. Den egentlige beskaffenhed af denne energistråling er stadig ukendt...

Sådan lød begyndelsen til præsentationstalen for den første Nobel Pris i fysik, år 1901.

Det nok mest berømte af alle "Röntgenogrammer" blev optaget i Röntgens laboratorium en novemberaften i 1895, da Röntgens kone Anna placerede sin hånd mellem et katodestrålerør og en fotografisk plade, Röntgen havde stillet op. Da den fotografiske plade blev fremkaldt, så han en vag, spøgelsesagtig aftegning af en hånd, med skygger, hvor knoglerne lå, og med en tydelig sort stribe henover ringfingeren; vielsesringen. Disse mystiske stråler, der kunne gennemtrænge organiske materialer og tyndt



Figur 1.3: Billedt af Fru Röntgens hånd fra 1895 og et moderne medicinsk Röntgen-billede.

metal, var helt ulige noget, man på den tid kendte til, og den lidt mystiske betegnelse "X-stråler", som Röntgen som sagt gav dem, var velvalgt. Til at begynde med, fortalte Röntgen ingen andre end sin kone om opdagelsen. Han var simpelthen bange for, at folk skulle tro, han var skør. Da han offentliggjorde opdagelsen i januar 1896, skrev han blandt andet:"...und nun ging der Teufel los", og nu går fanden løs.

Men Röntgen var langt fra den eneste, der i sidste århundredes første decennie tog til Stockholm på grund af unikke og epokegørende opdagelser. Snart skulle hele fysikken og dermed vort verdenssyn revolutioneres.

Radioaktiviteten. Samme år som Röntgen gjorde sin opdagelse i den tyske by Würtzburg, blev Antoine Henri Becquerel udnævnt til professor ved Ecole Polytechnique i Paris. Han blev interesseret i Röntgens stråler samme dag, nyheden om dem nåede hans ører, og da han var i besiddelse af en mængde naturligt fosforescerende uransalte (Becquerels far, Alexander, havde også været fysiker, og Antoine havde blandt andet arvet sin faders uransalte), satte han sig med det samme for at undersøge, om der var en forbindelse mellem den selvlysende effekt (fosforescens), Röntgen så i sine vakuumrør, og naturligt forekommende fosforescens, sådan som uransaltene besad. Kunne disse salte, i lighed med Röntgens X-stråler, eksponere fotografiske plader gennem uigennemsigtige materialer?

Det kunne de! men alligevel kunne der ikke være tale om den samme type stråler som dem, Röntgen havde opdaget. Strålerne fra uransaltene kunne afbøjes af magnetfelter, hvilket aldrig var sket for Röntgen-stråler. Man måtte indse, at man var stødt på et nyt, omend beslægtet, fænomen, og de nye "Becquerel-strålers" oprindelse stod ligeledes som et mysterium for den videnskabelige verden.

Becquerels opdagelser fik dog ikke nær så meget opmærksomhed som Röntgens, og Becquerel selv gik efter nogle indledende undersøgelser over til studier af andre fænomener. I stedet blev det den polskfødte fysiker Marie Sklodowska, der kom til at levere det afgørende stykke arbejde i opdagelsen og udforskningen af radioaktiviteten. I juli 1895 blev hun gift med Pierre Curie, der samme år tog sin doktorseksamen i fysik. Deres ægteskab, der nok er fysikkens mest berømte, er fantastisk smukt beskrevet i datteren Eve Curies biografi, "Madame Curie". Det er en bog, der ikke kan anbefales nok.

Pierre og Marie begyndte deres studier af radioaktiviteten i 1898. Det var faktisk dem, der gav fænomenet navnet "radioaktivitet", betydende "aktivt strålende". De bemærkede, at de særlige "radioaktive" grundstoffer, af hvilke der endnu kun kendtes en håndfuld, var kontinuerlige energikilder, og da en af fysikkens højeste love er loven om energiens bevarelse,

funderede de over, hvor al den energi, stofferne strålede ud, kunne komme fra. I 1899 og i år 1900 udkastede de to grundlæggende hypoteser, der begge kunne få energiregnskabet til at gå op. I dag ved de fleste, hvilken der er den rigtige, men det er alligevel spændende at se, hvilke tanker datidens fysikere gjorde sig.

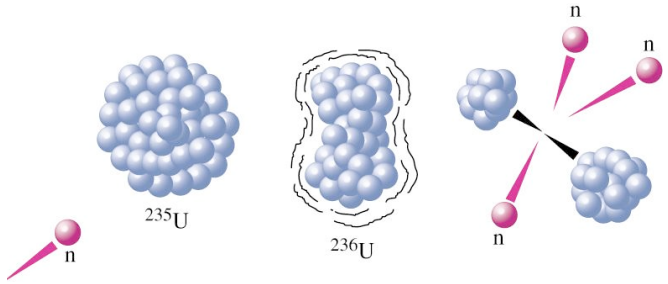
Den første hypotese gik ud på, at der overalt i rummet fandtes en endnu ukendt form for stråling. Med de mængder af nye fænomener og nye typer af stråling, der var blevet opdaget hidtil kunne det lyde ganske plausibelt. Den særlige egenskab, som de radioaktive elementer besad, ville så være, at de som de eneste kunne omdanne denne stråling til energiformer, der kunne detekteres i laboratoriet.

Den anden hypotese, som var mere radikal, gik ud på, at strålingen var en egenskab ved stofferne selv, at atomer kunne omdannes til hinanden under udløsning af store mængder energi. Denne hyoptese stod i stærk kontrast til al kendt fysik. Da Pierre Curie i 1905 fik Nobelprisen i fysik sammen med Madame Curie, beksrev han den anden hypotese således:

> Mængden af varme som Radium udløser over nogle år er enorm sammenlignet med varmen udløst i kemiske reaktioner. Dog er denne energi kun forbundet med omdannelsen af en så lille mængde Radium, at det ikke kan ses selv efter års forløb.
>
> Dette fører os til antagelsen om, at transformationen er mere vidtrækkende end ved almindelige kemiske processer, at selve atomets eksistens er i fare, og at vi her bevidner en elementernes transformation.

Atomernes transmutation tilhørte dengang alkymiens metafysiske verden, læren om de vises sten, med hvilken man som bekendt skulle kunne gøre uædle metaller ædle. Dertil kommer, at man, hvis denne hypotese var sand, skulle kunne observere, at mængden af det radioaktive stof svandt med tiden, og dette så ikke ud til at være tilfældet i første omgang.

Men som undersøgelserne skred frem stod billedet mere og mere klart. Stoffer med kortere halveringstider end de naturligt forekommende blev skabt, og man kunne ganske enkelt se stofmængden svinde ind med tiden ved disse elementer. Man lagde mærke til, at dannelsen af Helium ofte ledsagede de radioaktive fænomener, og man kunne med hypotese nummer 2 forklare hvorfor Radium aldrig forekom i naturen, uden det var sammen med Uran, ved at antage, at Radium dannes som biprodukt, når Uran stråler. Den første hypotese kunne ikke give nogen forklaring på disse fænomener, og gradvist blev man overbevist om, at teorien om



Figur 1.4: Neutron-induceret fission som det foregår i moderne kraftværker.

elementernes transmutation var sand, omend ikke helt som alkymisterne havde forestillet sig den.

I dag ved vi meget mere om dette forunderlige fænomen, der skulle åbne atom- og kernefysikken for menneskets udforskning. Set i bakspejlet maner det til forsigtighed, for til historien om Marie og Pierre Curie, radioaktivitetens absolutte pionerer, hører også beretningen om, hvorledes deres arbejde påvirkede deres helbred, dog uden de selv forstod årsagen dertil.

Pierre eksperimenterede selv med radioaktivitetens effekter på den menneskelige organisme. Han satte en forbinding på sin arm, der indeholdt radiumsalte og studerede sårets udvikling. Efter 52 dage havde han et gråt ar, der aldrig forsvandt. Både Pierre og Maries fingre blev gradvist arrede og optændte, og Pierres ben og hænder rystede så meget, at han måtte søge læge. Den recept på stryknin, han fik udskrevet, har sikkert ikke hjulpet ham stort. De led begge af træthed, men Pierre gik stadig rundt med lidt Radium i lommen, han kunne vise til vennerne, og Marie havde stadig lidt Radiumsalt på hendes natbord, der lyste flot i mørket. De papirer, de efterlod sig, er så radioaktive, at hvis man vil se dem på Bibliotheque Nationale, skal man underskrive en erklæring om, at man gør det på egen risiko. Faktisk var der ingen, der med det samme begreb faren ved de radioaktive elementer. Den store engelske fysiker Ernest Rutherford var dybt begejstret, da en af hans kolleger viste ham, at hans ånde var radioaktiv. Det beviste hans teori om, at radioaktiviteten kunne være luftbåren!

En meget lille partikel. Næsten samtidigt med, at ægteparret Curies arbejde med de strålende stoffer begyndte, arbejdede Sir Joseph John Thomson på Trinity College i Cambridge. Han studerede såkaldte katodestrålerør, der var betegnelsen for gasfyldte rør med en negativt ladet elektrode i den ene ende. Når elektroden afladedes begyndte rørets sider

at fosforescere med et grønligt lys. Ligesom for radioaktiviteten eksisterede der to dominante meninger om katodestrålernes oprindelse.

Den første, der hovedsageligt proponeredes af engelske fysikere, var at strålerne bestod af negativt ladede partikler, der blev skudt ud fra katoden med vældige hastigheder, når den afladedes. Det andet, der havde sit hovedsæde i Tyskland, holdt på, at strålerne var en slags æteriske bølger eller vibrationer.

Man havde set, at strålerne kunne afbøjes af et magnetfelt, hvilket tydede på at partiklerne virkeligt var negativt ladede som i den første forklaringsmodel, og man havde ligeledes observeret, at objekter, der blev bestrålet med katodestrålerør, gradvist blev negativt ladede, i overensstemmelse med, at strålerne overførte negativ elektrisk ladning. Men man havde ikke kunnet afbøje strålerne i *elektriske* felter, og strålerne kunne trænge igennem tynde metalstykker, hvad ingen kendt gas af partikler kunne.

Grunden til det første, antog Thomson, var at katodestrålernes passage gennem gas gjorde gassen ledende, således at strålerne altid var omringet af ledende materiale, et Faraday-bur, der som bekendt afskærmer totalt for elektriske felter. Han begyndte derfor at eksperimentere med næsten evakuerede katodestrålerør, hvor den ringe gasmængde skulle gøre, at de mystiske stråler skulle kunne afbøjes på trods af gassens ledningsevne.

Grunden til det andet skulle søges i elektronens ringe størrelse. Indtil da var brint-atomet det mindst kendte objekt i fysikken, men Thomson fandt ved et eksperiment, der idag hører til fysik-laboratoriets absolutte klassikere, at forholdet mellem ladningen og massen på en elektron var 1700 gange større end for "det ladede brint-atom", som protonen kaldtes. Da man i tillæg kunne vise, at ladningens størrelse var den samme, måtte katodestråle-partiklernes masse være ca. 1700 gange mindre end protonens.

Fredag den 30. april 1897 gav han så sin tale til Royal Institution. Denne dag kan retteligt betragtes som elektronens fødselsdag, og om præcist en uge fylder den altså 105 år. Thomson havde set katodestrålerne blive afbøjet i den retning, man skulle forvente af negativt ladede partikler og han havde forklaret, hvorledes partiklerne kunne passere gennem tyndt metal, på grund af deres ringe størrelse.

I hans nobeltale fra 1906, bemærker han:

> Thus the atom is not the ultimate limit to the subdivision of matter; we may go further...
> The corpuscles appear to form a part of all kinds of matter

> under the most diverse conditions; it seems natural therefore to regard it as one of the bricks of which atoms are built up.

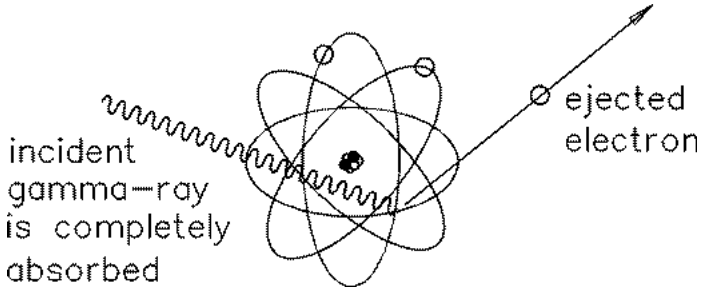
Max Planck og Lysets natur. Set med eftertidens øjne er det her, det begynder; Curierne ser atomer disintegrere for deres øjne, Thomson opdager en partikel, der er meget mindre end selv det mindste atom, dørene til en ny verden er ved at gå op. Men som det ofte er tilfældet, er vejen til oplysning mere kroget end snorlige. Helt uafhængigt af spekulationerne omkring radioaktiviteten og katodestrålerne gjorde den tyske fysiker Max Karl Ernst Ludwig Planck i år 1900 en meget bemærkelsesværdig opdagelse, der med rette har givet ham titelen som kvantemekanikkens fader.

Max Planck forsøgte at forstå, hvorledes opvarmede legemer strålede, den såkaldte sortlegemestråling. Nogle år forinden havde fysikeren Wilhelm Wien opdaget sin berømte forskydningslov, hvormed man kunne bestemme den bølgelængde, der var mest dominerende i lysspektret for et legeme af en given temperatur. Planck ville ikke blot undersøge, hvor den toppende bølgelængde lå, men hvorledes hele spektret så ud. Og han ville gøre det i overensstemmelse med Kirchoff's princip, at intensiteten af stråling ved en given bølgelængde alene skulle afhænge af legemets temperatur og dermed ikke af legemets andre fysiske eller kemiske egenskaber.

Den formel, Plack fandt, indeholdt to konstanter. Den ene beskrev antallet af molekyler i et gram stof, Avogadros konstant, den anden havde Planck til at begynde med ingen fornuftig forklaring på, men dens eksistens betød, at de elektromagnetiske bølgers energi eksisterede i form af pakker eller kvanter, hvilkes energiindhold er direkte proportionale til bølgernes frekvens. Proportionalitetskonstanten gav han symbolet h; den hedder nu Plancks konstant og er en af de mest fundamentale konstanter i fysikken.

Denne ide, at man ved en bestemt frekvens enten måtte udsende multipler af h gange ν i energi eller slet ingenting stod i stærk kontrast til den klassiske Maxwellske elektromagnetisme, hvorfra ingen sådan begrænsning kunne udledes. At lys skulle udsendes i små pakker, hvoraf hver har en energi af størrelsen $h\nu$, forekom mange absurd, og Plancks formel mødte skepsis, på trods af de mange eksperimentelle resultater, den kunne forklare.

Den mest drastiske støtte til dette radikale brud på den klassiske fysiks love leveredes af Einstein i 1905, samme år som hans specielle relativitetsteori blev publiceret. Einstein beviste simpelthen direkte, at lyskvanter måtte eksistere:



Figur 1.5: Skematisk illustration af den fotoelektriske effekt.

Man havde i nogen tid søgt at forklare den såkaldte fotoelektriske effekt. Navnet dækker over, at metaller, der belyses med violet eller ultraviolet lys, afgiver elektroner. Man kendte to tilsyneladende uforklarlige egenskaber ved den effekt:

1. Når man varierer intensiteten af det ultraviolette lys ved en bestemt frekvens, forbliver de udsendte elektroners energi konstant, men deres antal øges i direkte proportion til forøgelsen af lysintensiteten.
2. Når man holder intensiteten fast men varierer frekvensen, emitteres *ingen* elektroner, før man når en vis grænsefrekvens. Ovenfor denne frekvens stiger elektronernes energi i direkte proportion til lysfrekvensen, mens deres antal er konstant.

Einsteins forklaring på disse egenskaber var lige så simpel som den var genial. Antager man, at lyset kommer i små pakker, hvis energi er proportionale til frekvensen, vil man ved at øge intensiteten af strålen 1) få flere pakker og dermed rive flere elektroner løs, mens 2) energien af pakkerne ikke forandres, og derfor vil elektronernes energier heller ikke forandres. Varierer man frekvensen af lyset, ændrer man energi-indholdet i hver pakke. Ved en given frekvens bliver pakkernes inergiindhold så ringe, at de ikke længere er i stand til at rive elektronerne løs. Over denne tærskel, bliver pakkernes energi minus løsrivelsesenergien til bevægelsesenergi hos elektronerne, og man skulle derfor se, at elektronernes antal forblev konstant, mens deres energi blev større, når man varierede frekvensen, en eksakt beskrivelse af den fotoelektriske effekt, illustreret i figur 1.5.

Som sagt, så gjort. Plancks strålingstoeri steg i graderne, og både han og Einstein modtog Nobelprisen for deres arbejde, Planck i 1918 og Einstein i 1921. I Plancks egne poetiske ord lød hypotesen om kvanternes rejse mod anerkendelse således:

> An indispensable hypothesis, even though still far from being a guarantee of success, is however the pursuit of a specific aim, whose lighted beacon, even by initial failures, is not betrayed.

Og nøgleordet for kvantehypotesen var netop *indispensable*. Teorien gik fra sejr til sejr, hvad ingen alternativ teori formåede, men fysikerne var stadig i vildrede om, hvor dybtgående denne hypotese skulle fortolkes.

Kapitel 2

Niels Bohr og Kvanterne

Som dansker kan man let forledes til at tro, at Bohr har en særlig status i Danmark, fordi han var dansk, og sådan er det naturligvis også. Men hvad enten man er dansk eller ej, var og er Bohr en af fysikkens ubestridt største. Jeg er ofte blevet spurgt, når jeg har været på besøg ved institutter i udlandet, hvordan det er at gå rundt på det berømte Niels Bohr Institut. Folk er simpelthen nysgerrige efter at danne sig et billede af, hvordan det sted ser ud, hvor kvantemekanikken blev skabt.

Nu er vi tæt ved det punkt i fortællingen, hvor William Wollastons gådefulde mørke linier i solens spektrum, som han så i George den tredies England, endelig kan få en forklaring. Niels Bohr forenede Plancks strålingsteori med Rutherfords atom ved at tænke sig, at atomer kun kan eksistere i ganske bestemte og adskilte tilstande med hver sin tilhørende energi. Når stråling udsendes sker det ved, at atomet overgår fra en tilstand med høj energi til en tilstand med lavere energi. Når lys opfanges (absorberes) af atomet, sker det modsatte. Lysets energi skulle da være givet ved:

> Energien af et udsendt lyskvant = Energien af atomet i den højereliggende tilstand (begyndelsestilstanden) minus energien af atomet i den lavereliggende tilstand (sluttilstanden).

Med Plancks formel for energien af et lyskvant ser det således ud på formel:

$$E_{lyskvant} = h\nu = E_2 - E_1 \tag{2.1}$$

Således kunne Bohr forklare eksistensen både af de Fraunhoferske linier i solens spektrum og selvfølgeligt også de utallige andre linier tilhørende hver deres grundstof, der siden 1700-tallet var blevet opdaget og katalogiseret som grundlag for den i astrofysikken så uhyre vigtige disciplin, spektroskopien. Et atom absorberer ikke lys af en hvilken som

helst bølgelængde. Det er kun de lyskvanter, der lige netop har den bølgelængde (eller tilsvarende: frekvens eller energi), der svarer til en overgang fra den tilstand atomet er i, til en højereliggende tilstand, der bliver absorberet, og det er denne absorption, der viser sig som mørke linier, hvis man lader et kontinuert spektrum skinne igennem en gas.

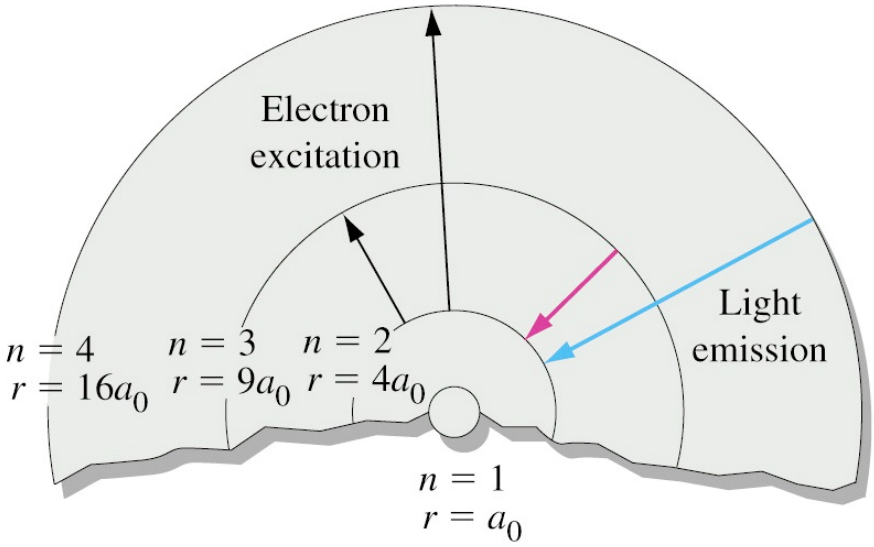
Dette er lige præcist tilfældet med Solen. Processerne i Solens indre sender lys ud ved alle mulige tænkbare frekvenser, og for de fleste af dem er Solen nogenlunde gennemsigtig, men for visse af dem, der netop svarer til overgange i de atomer, Solens atmosfære består af, er den uigennemtrængelig som det sorteste blæk.

Et forunderligt solsystem: Bohrs atommodel så altså således ud: rundt om en positivt ladet kerne findes en sværm af elektroner. Disse elektroners baner er kvantiserede, således at atomets hvile-energi ikke kan antage vilkårlige værdier, men kun nøje bestemte og adskilte værdier. Atomet kan kun ændre sin tilstand ved at hoppe mellem disse niveauer, ved at udføre "kvantespring".

En del af hypotesen var også, at der fandtes en vis laveste energitilstand i atomet. Dette gjorde Bohrs atom stabilt, i modsætninng til atomerne i den klassiske teori, der kunne stråle al elektronernes bevægelsesenergi bort på en brøkdel af et sekund, så elektronerne havnede inde i kernen. I Bohrs teori var der en mindste bevægelsesenergi svarende til en vis atomradius, der ikke kunne stråles bort.

Den tiende december 1922 modtog Bohr Nobelprisen i fysik. På det tidspunkt forstod man stort set udelukkende atomet på baggrund af Bohrs teori. Bohr selv holdt af at sammenligne hans atom med et planetsystem, og tanken er ganske nærliggende, da den klassiske elektromagnetisme ligner gravitationen til forveksling, og da man også i atomerne har en uhyre tung central masse omgivet af meget lettere masser. Men når Bohr talte om atomet som solsystem, var det med et specifikt formål for øje. Når han havde beksrevet lighedspunkterne, kunne han illustrere hvor radikalt anderledes kvantemekanikken var fra den klassiske fysik ved at beskrive forskellene.

For eksempel afhænger solsystemets øjeblikkelige tilstand af, hvad der før er sket i systemet, dets historie. Planeternes baner kan ændres af tunge legemers passage gennem systemet og så videre. Således forholder det sig absolut ikke i Bohrs atom. Ideen med de stationære tilstande i atomet betyder, at der ikke er "plads" til information om atomets tidligere historie. Atomet har kun et endeligt antal tilstande, og man kan ikke på en tilstand se, hvordan atomet havnede i den tilstand. Efter en udefra kommende forstyrrelse, vil atomet ordne sine baner igen, som en god



Figur 2.1: Bohr's atommodel.

husholderske, så de udelukkende er bestemt ved partiklernes ladninger og masser. Det er netop derfor, vi kan slutte, at en vis spektrallinie i en fjern stjerne altid betyder, at stjernen virkeligt indeholder det grundstof, der giver den samme linie i forsøg på Jorden. På den måde er atomer faktisk meget simplere end solsystemer.

Et af Bohr's mest berømte resultater er utvivlsomt hans nøjagtige forklaring af linierne i brints spektrum, hvor den inderste banes radius i dag kaldes Bohr radius med symbolet a_0. Denne mindste atomstørrelse ligger på ca. en halv Ångstrøm, eller ca. en halv milliontedel millimeter. Atomer *er* virkeligt ganske, ganske små. Og dog, for nutidens højenergifysikere virker selv atomer som kæmpemæssige Jordkloder i forhold til de partikler, vi betragter. Det kan ikke overdrives, hvor hurtigt udviklingen i sidste århundrede begyndte at gå, efter Bohrs atomteori kom på banen.

Også fra et lidt mere filosofisk synspunkt bidrog Bohr til kvantemekanikken. Med hans berømte korrespondens-princip forbandt han den klassiske fysik med kvantemekanikken. Ifølge korrespondensprincippet er der en glidende overgang fra den klassiske fysik udtrykt i klassiske termer til mindre og mindre længdeskalaer, hvor kvanteteoriens særegne karakteristika bliver mere og mere udtrykte. Når kvantetallene bliver meget store, bliver kvantemekanikken lig med den klassiske teori af Maxwell.

Sagt på en anden måde siger korrespondensprincippet, at da den klassiske fysik ikke på noget sted indeholder Plancks konstant, må man fra kvantemekanikken opnå den klassiske fysiks love, når Plancks konstant

bliver lille i forhold til de relevante størrelser, man betragter.

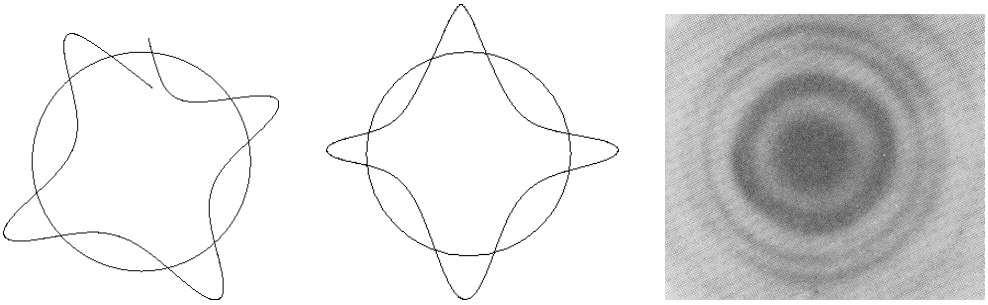
Dette gør også, at man i første tilnærmelse kan snakke om kvantemekaniske effekter som små fluktuationer omkring den klassiske fysiks løsninger. Denne konklusion er stadig hovedårsagen til, at fysikerne af i dag overhovedet er i stand til at regne på de moderne partikelfysiske teorier.

Atomernes sprog: Men der skulle mere til, før kvantemekanikkens fulde implikationer gik op for fysikerne. Bohr brugte megen tid på at forsøge at forstå, hvordan man sprogligt kunne udtrykke kvantemekanikken. Han var af den opfattelse, at hele vores sprog bygger på den dagligdag, vi lever i, og at en verden så fjern fra dagligdagen som atomernes ikke kunne forventes at lade sig udtrykke gennem dette sprog. I stedet tog han det radikale synspunkt, at man måtte forsøge at fortolke kvantemekanikken på dens eget abstrakte sprog, teorien (matematikken) og eksperimentet.

Disse tanker førte ham til komplimentaritetsprincippet. Det var en gåde for fysikerne, hvorledes fx elektroner undertiden optrådte som bølgelignende fænomener, undertiden som partikellignende. Bohrs centrale tanke var, at når nu kvantemekanikken viste sig at være således indrettet, burde mennesket ikke forsøge at tvinge elektronerne til at adlyde menneskets fornuft, snarere tværtom. Kvantemekanikken skulle fortolkes på dens egne præmisser, uden brug af fornuft. Logikken var soleklar, så snart den var formuleret; fornuften er baseret på erfaringer gjort i en verden, der næsten intet har tilfælles med den verden, atomfysikerne søgte at forstå, derfor bliver den mere en hindring, en modstand mod det ukendte, end en fordel i deres arbejde.

Bohr mente således, at man godt kunne have to hinanden udelukkende beskrivelser af samme objekt levende side om side. Pointen var og er, at netop idet de to beskrivelser udelukker hinanden, kan man ikke konstruere et eksperiment, der samtidigt er følsomt overfor dem begge. Ved at foretage en måling, tvinger man det betragtede til at opføre sig som enten den ene eller den anden beskrivelse foreskriver.

Bølger på virkelighedens ocean: Den første, der virkeligt lavede god fysik på komplimentaritetsprincippet var Prins Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie, der som navnet antyder, var søn af en fransk adelsmand, Duc Victor de Broglie. de Broglies Ph.d. afhandling "Recherches sur la Théorie des Quanta" (Undersøgelser af kvanteteorien) forbandt nøje konceptet om en partikel med konceptet om en tilhørende bølge. Som Bohr ville have sagt det, er disse to koncepter komplementære, altså gensidigt udelukkende. de Broglie mente derfor, at det måtte være



Figur 2.2: En elektron repræsenteret som stående bølge. Billedet til venstre svarer til en "forbudt" bølgelængde, billedet i centrum til en af det Bohrske atoms stationære tilstande. de Broglie viste på denne måde, at man kunne fortolke kravet om kvantisering som et krav om stående bølger. Til højre ses et billede taget i 1927. Det viste, at de Broglies konklusioner var korrekte, at elektroner kan udvise bølgelignende egenskaber som det interferensmønster, der ses på billedet.

muligt at etablere en vis parallellisme mellem bevægelsen af en partikel og propageringen af dens associerede bølge.

Han begyndte ved at lægge mærke til to helt indlysende fakta, der virkeligt gik helt ind til benet af problematikken og viste, hvor dybt forbundne de to beskrivelser var; for det første bemærkede han sig, at i Plancks formel udtrykkes energien af en "lys*partikel*" som en konstant gange en *frekvens*. På den ene side af ligningen noget partikelagtigt, på den anden noget, der forbindes med bølger og periodiske fænomener.

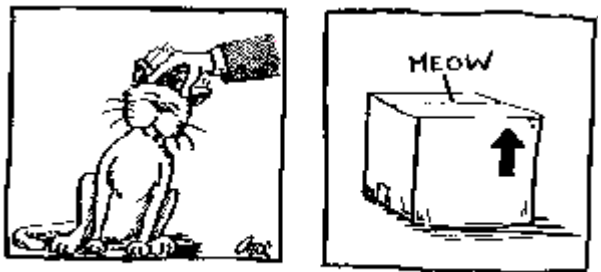
På den anden side involverede bestemmelsen af de stabile baner for elektronerne i atomerne *kvantetal*, heltal. Op til det tidspunkt var de eneste steder i fysikken, hvor heltallene spillede en rolle i interferensfænomener og vibrationseffekter. Igen noget bølgeagtigt vævet sammen med noget partikelagtigt.

Han fortolkede elektronen som en "stofbølge" med en karakteristisk bølgelængde, der idag er opkaldt efter ham. Denne bølgelængde, der er karakteristisk for ethvert legeme er blot Plancks konstant delt med partiklens impuls. Man kan lige så godt tænke på elektronen som en partikel i atomet som på en stående bølge omkring det (se figur 2.2 ovenfor). Dette satte gang i tanker om, at man kunne skabe en sammenhængende kvantemekanisk teori baseret på bølger, og den Østrigsk fødte fysiker Erwin Schrödinger, der ikke var helt tilfreds med, hvordan Bohrs kvantemekanik så ud, blev ham, der skabte den.

Faktisk dukkede der i 1925 to vidt forskellige formuleringer af kvantemekanikken op næsten samtidigt med hinanden. Den ene var baseret

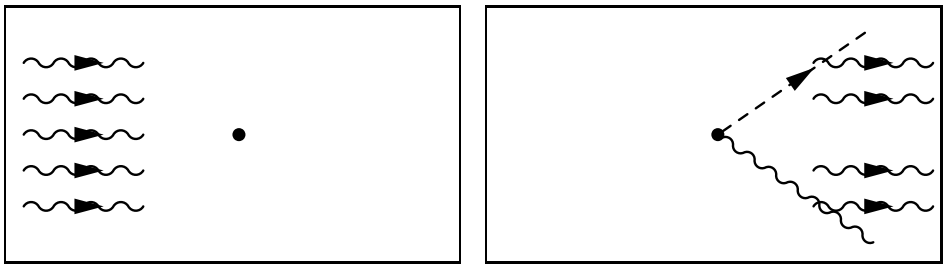
på Schrödingers bølgeligning, den anden på Werner Heisenbergs såkaldte matrixmekanik. Da Schrödinger arbejdede udenfor og Heisenberg i København, blev Heisenbergs formulering simpelthen kaldt kvantemekanikken og Schrödingers formulering bølgemekanikken i begyndelsen. Det blev dog efterhånden klart, at de to beskrivelser, på trods af deres meget forskellige udseende og formuleringer, var identiske.

Schrödingers kat – død eller levende: Udenfor den fysiske videnskab er Schrödingers navn nok bedst kendt for hans tankeeksperiment, Schrödingers kat, der belyser det for vor fornuft lidt sindssyge i Bohrskolens fortolkning af kvantemekanikken, en fortolkning, der kom til at gå under navnet "Københavnerfortolkningen". Schrödingers eksperiment var som følger: Lad os forestille os, at vi lukker en kat inde i en kasse sammen med en radioaktiv kilde og en detektor. Vi lader herefter detektoren være tændt et enkelt minut. Hvis den registrerer en partikel fra den radioaktive kilde, udløses en dødelig gas i kassen, ellers sker der intet. Efter det kritiske minut er gået, ved vi ikke, om detektoren har registeret noget eller ej. Følgeligt ved vi ikke, om katten er levende eller død. Det radikale i Københavnerfortolkningen af kvantemekanikken er, at den siger, at kattens fysisk virkelige eksistens indtil nogen kigger i kassen er en blanding af "død kat" og "levende kat", ikke som det ene eller det andet. Det kræver en del at vænne sig til den slags, men det er netop sådan, man må tænke på kvantefænomener. Den såkaldt objektive virkelighed eksisterer ikke. Der eksisterer i naturen kun sandsynligheder, indtil en måling foretages.



Theoretician's Cat Experimentalist's Cat

Dette er det essentielle i kvanteteoriens mærkværdige univers. Det observerede og det observerende er ikke uafhængige. Man kan ikke observere noget uden at ændre det på en eller anden måde. Det var i det store hele Bohr og hans elev Heisenberg sammen med Max Born, der udviklede denne fortolkning, og de fik Einstein som deres mest formidable modstander. Det, Einstein ikke kunne acceptere, var Københavnerfortolkningens postulat om determinismens død. At selv Gud spillede med



Figur 2.3: Illustration af usikkerhedsprincippet. Se tekst.

terninger, uden selv at vide nøjagtigt, hvad udkommet ville blive. Selv for Gud ville katten eksistere som en blanding af død og levende, indtil nogen kiggede i kassen.

Einstein fortsatte med at modsætte sig dette synspunkt til sin død i 1955, dog mest på et filosofisk niveau og uden at ødelægge den respekt og det varme venskab, der var opstået mellem ham selv og Bohr.

Usikkerheden breder sig: Partikel-bølge dualiteten var ikke den eneste store forståelsesmæssige revolution, som komplimentaritetsprincippet medførte. I 1927 formulerede Heisenberg det berømte usikkerhedsprincip, eller ubestemthedsrelationen som den også kaldes. Han reflekterede over, hvorvidt det ville være muligt at måle en partikels position på samme tid som man målte dens hastighed, eller mere korrekt dens impuls. Han kom til den slutning, at sted og hastighed var komplementære; en præcis måling af een af dem ville umuliggøre en samtidig præcis måling af den anden størrelse.

Man kan komme til samme slutning på en meget enkelt måde, hvis man forestiller sig en blind astronaut, der leder efter sine nøgler. Idet han støder ind i dem, giver han dem nødvendigvis et lille skub, så de ændrer deres bevægelsestilstand. Han kender således i det øjeblik deres position, men han kender ikke deres hastighed hverken før eller efter sammenstødet. På samme måde er det med elementarpartikler. Den eneste måde at "se" dem på, er ved at lade dem støde ind i noget, fx fotoner.

Lad os sige, vi har en meget lille partikel og at vi ønsker at måle dens position. Lad os endvidere sige, at vi til at begynde med ved, at partiklen er i hvile. For at finde ud af, hvor partiklen er, skyder vi nogle fotoner efter den (første rude i figur 2.3). En af dem rammer og afbøjes, målingen er gjort. Vi ved nu, hvor partiklen var på det givne tidspunkt (indenfor måleusikkerheden), men den er ikke længere i hvile! Fotonen, der stødte sammen med den har given den en hastighed af ukendt størrelse. Dette forhold udtrykkes i det Heisenbergske usikkerhedsprincip:

> Usikkerheden på hastigheden gange usikkerheden på stedet er altid større end eller lig med Plancks konstant delt med massen af det betragtede objekt.

På ligningsform ser dette således ud:

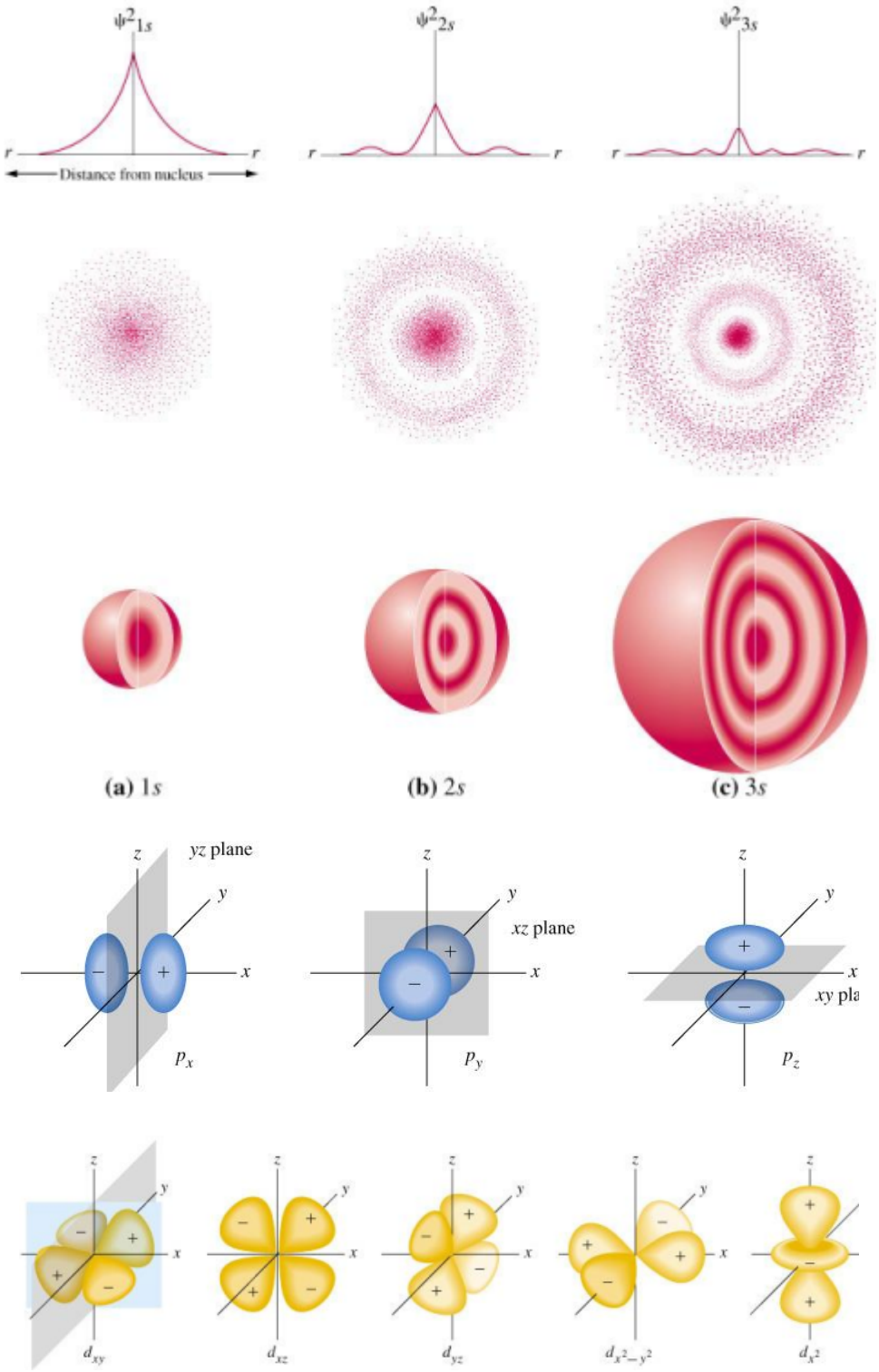
$$\Delta x \Delta v \geq \frac{h}{m} \tag{2.2}$$

Sted og hastighed er komplementære størrelser. Viden om den ene udelukker viden om den anden. Jo mere nøjagtigt stedet ønskes bestemt, jo mindre nøjagtigt kan impulsen bestemmes.

Misantropiske partikler: Det sidste, der skete før næste kapitel, var Wolfgang Paulis opstillelse af udelukkelsesprincippet for fermioner. Fermioner er betegnelsen for partikler, der deler en speciel egenskab med fx elektroner og protoner. Denne egenskab gav sig for datidens fysikere udtryk i partiklernes magnetiske egenskaber. Fermionerne har halvtallige magnetiske kvantetal, hvorimod den anden type af partikler, bosoner som fx lyskvanter (fotoner), har heltallige magnetiske kvantetal. Dette giver faktisk anledning til enorme forskelle, både mellem hvordan de to typer af partikler opfører sig og mellem hvordan de beskrives, men det er ikke noget, vi skal komme nærmere ind på her.

Paulis postulat var, at mens bosoner godt kunne "dele" en kvantetilstand, så var det umuligt for fermioner. Når først een elektron havde sat sig fx i en atomar energitilstand, så måtte resten af elektronerne finde andre tilstande at befolke. Det er det, der gav anledning til den såkaldte elektron-skalmodel og dermed hele forklaringen på det periodiske system, hvor mere og mere energetiske orbitaler i atomerne gradvist fyldes op af elektroner, der ikke kan finde plads længere inde i atomet.

I figur 2.4 er vist formen på nogle af orbitalerne. Disse former viser *sandsynlighedstætheden*, hvilket er kvadratet på bølgefunktionen. Øverst ses tre måder at "tegne" de simpleste orbitaler. Den øverste måde viser sandsynlighedstætheden som funktion af afstanden fra kernen. De to næste viser det samme på forskellige måder, som tæthedsplot og med farvekode, hvor mørkerød betøder højest sandsynlighed. Disse sandsynlighedsamplituder er netop det, Bohr talte om, der eksisterer i virkeligheden, i stedet for "en elektron her og en elektron der". Laver man en stor mængde målinger på et brintatom vil man oftest finde elektronen (der normalt befinder sig i den øverste tilstand længst til venstre) tæt ved kernen. Andre orbitaler har andre fordelinger, som det ses længere nede på figuren.



Figur 2.4: Ekspempler på orbitaler i brint-atomet.

Kapitel 3

Kvanterne bliver relativistiske

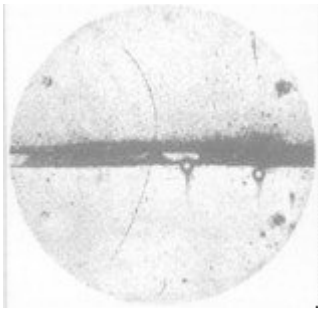
På trods af de store kameler, man allerede havde måttet sluge, holdt kvantemekanikken ikke inde med sine fornuftsstridige overraskelser. Selv om Pierre Curies ord om, at selve atomets eksistens kunne være i fare ville have lydt fuldkomment sindssyge 30 år tidligere, var atomets transformationer nu blot det mindste af de nye ting, man vænnede sig til. Det eneste bedrøvelige ved kvantemekanikken er, at den er sværere tilgængelig for intuitionen end relativitetsteorien, og derfor har den aldrig haft den samme public appeal. Kvantemekanikken er hård ved fornuftige mennesker, og vil man rigtigt forstå den er der ingen vej udenom at give sig i kast med ganske langhåret matematik. Det vidunderlige ved kvantemekanikken er, at man ikke bliver skuffet. Den åbner dørene til helt eventyrlige verdener, hvor mennesket kun kan træde i form af dets sind, som en blind, der har fået synet tilbage uden rigtigt at vide, hvorledes han skal fortolke de ting, hans nye sans fortæller ham. Det meste af det, han ser, kan han fortolke som velkendte lyde, lugte, smags- og følelsesindtryk, men intet han tidligere havde oplevet kunne have forberedt ham på himmelrummet.

Dirac og Antistoffet: I 1933 gav Paul Adrian Maurice Dirac sin Nobelforelæsning. Han havde fået prisen for at lave en relativistisk bølgeligning for elektroner tilbage i 1928. Nu kunne man regne på elektroner, også når de havde fart på. Det eneste problem med hans ligning havde været, at den havde forudsagt eksistensen af tilstande med negativ energi!

Dirac mente til at begynde med, at hans egen teori var skør. Men den var for god til at lade ligge, så han blev tvunget til at gøre noget ved den. Den kunne i det mindste komme til at give en smule fysisk mening. Han postulerede, at alle de negative energitilstande allerede var fyldt op med elektroner, et slags hav af elektroner overalt i verdensrummet, og han fandt at man ikke kunne udelukke, at et sådant hav eksisterede, hvor

tosset ideen end måtte lyde. Der var dog stadig et problem med hans teori. I dens nye form forudsagde den, at en højenergetisk foton skulle kunne sparke en af de negative energi-tilstande, der jo nu var befolkede, op i en positiv energitilstand. For en observatør ville det se ud, som om en foton blev absorberet og en elektron skabt plus noget mere. Dette noget mere var den effekt, der ville opstå, når en af de negative tilstande ikke længere var der. Fraværet af en negativ ladning i havet ville få lige det sted i havet til at have lidt mindre negativ ladning end det omgivende hav, det ville altså se ud, som om en positiv ladning var skabt. På samme måde kunne en elektron, der lidt senere kom passerende, "falde ned" i hullet under udsendelse af en foton. Her ville det se ud, som om en elektron havde mødt en "positiv elektron" og annihileret med den. Diracs teori fra 1928 forudsagde eksistensen af antistof.

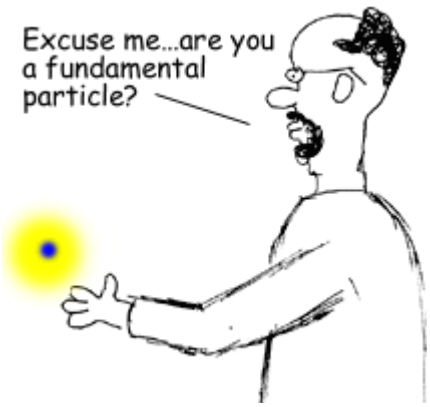
Dette kunne Dirac ikke tro på. I første omgang havde han håbet, at disse "positive elektroner", hans teori forudsagde, kunne være protonerne, men hans teori krævede, at elektronen og dens nye partner skulle have eksakt samme masser, og det gjorde protonen alt for tung til at kunne blive taget i betragtning. På grund af teoriens iøvrigt store succes gav folk sig dog til at lede efter "positronerne". Og ingen må være blevet mere overrasket end Dirac selv, da positronen *blev* opdaget i 1932. Fotografiet, der viser positronen blive afbøjet i et magnetfelt (hvilket afslører både fortegnet på denns ladning og dens masse) så således ud:



Antistof er altså ikke helt så nyt, som man måske skulle tro. Det fejrer 70-året for sin opdagelse i år.

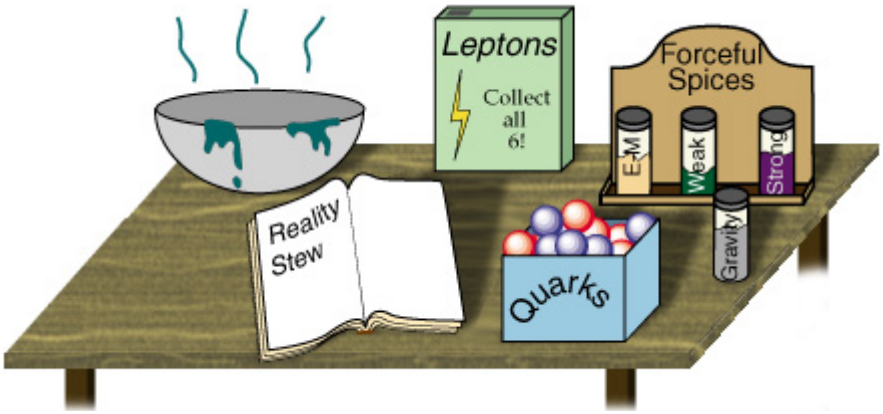
Fra kvantemekanik til kvarker: Nu tager vi et hurtigt spring til 1950'erne. Selvom kvantemekanikken selvfølgeligt udvikler sig ganske betragteligt i mellemtiden, er opdagelserne ikke længere præget af det samme skær som i dens spæde barndom. Det er selvfølgeligt mange spændende og ganske farverige opdagelser, vi på den måde springer over, men den moderne partikelfysik er så rig på egne fænomener og på avanceret teknik, at den fortjener at blive beskrevet ordentligt.

I mellemperioden opdagede man neutronen, i 1932, samme år som positronen, μ-leptonen [my] i 1937 (opdaget i den kosmiske stråling), og π-mesonen i 1947. Derudover opdagede man i 1953 nogle partikler med ganske sære egenskaber. Disse egenskaber fik fysikerne til at tro, at der måtte være et nyt bevaret kvantetal, som de i mangel af bedre kaldte særhed, "strangeness". Samme år bliver eksistensen af kvarker postuleret. Protoner og neutroner er hver dannet af tre kvarker, og π-mesonerne er dannede af et kvark-antikvark par. De nye sære partikler skyldes eksistensen af en tungere kvark, der ikke er stabil og derfor ikke eksisterer i normalt stof, den fik navnet den sære kvark, "the strange quark". Navnet kvarker har iøvrigt en ret obskur oprindelse. Det kommer fra James Joyce's stream-of-consciousness roman "Ulysses", hvor Muster Mark af og til optræder som sig selv, af og til i skikkelse af sine tre nevøer, kvarkerne. Forestiller man sig Hr. Mark som protonen er analogien (næsten) klar. I 1955 opdages antiprotonen og 1957 den spøgelsesagtige partikel, neutrinoen, som Pauli havde postuleret allerede tilbage i 1930.



Kapitel 4

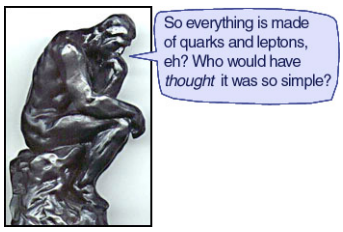
Den Moderne Partikelfysik



Det er idag en eksperimentelt verificeret kendsgerning i fysikken, at Naturens mest fundamentale bestanddele og vekselvirkninger kan beskrives med en enkel og sammenhængende teori – Partikelfysikkens Standardmodel. Denne model indeholder alle de kendte partikler og de kræfter gennem hvilke de vekselvirker med hinanden, dog med undtagelse af tyngdekraften, for hvilken ingen kvantemekanisk teori endnu har kunnet efterprøves. Modellen har eksisteret og er blevet forbedret siden 1970'erne og udgør idag vor bedste beskrivelse af naturens allermindste bestanddele: elementarpartiklerne. Vi ved dog, at Standardmodellen ikke kan være den ultimative teori, den endegyldige beskrivelse af stof og kræfter, for der er stadig mange ubesvarede spørgsmål - brikker i pudslespillet, der mangler og som udgør store udfordringer for dagens såvel som for fremtidens forskere. Lad os først se på standardmodellen selv.

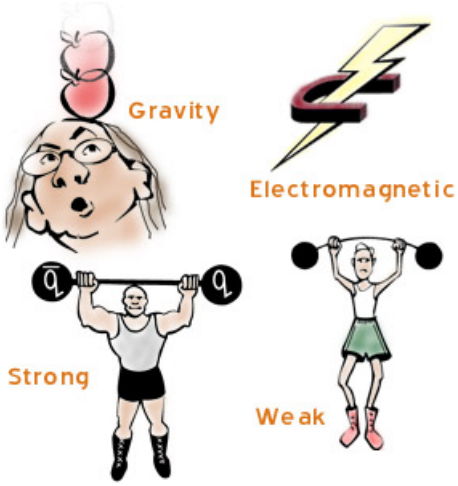
Vi ved idag, at alt stof både her på jorden og i stjernerne består af 6 forskellige slags kvarker og seks forskellige såkaldte leptoner. Kvarkerne danner partikler som protoner og neutroner, men er ca. 1000 gange mindre, og elektronen er et eksempel på en lepton. Det er kun op- og ned-

kvarkerne, der er stabile under normale forhold, deres 4 tungere søskende kan man skabe i moderne acceleratorer (den fjerde, top kvarken, blev opdaget i 1994 på det amerikanske Fermilab tæt ved Chicago), men de henfalder hurtigt til lettere partikler.



Sådan forholder det sig også med leptonerne, og dog er sagerne her alligevel lidt anderledes. De to tungeste leptoner, tauonen og myonen, henfalder hurtigt til lettere partikler, mens elektronen er stabil. De tre sidste leptoner er meget specielle, det er elektron-neutrinoen, myon-neutrinoen, og tauon-neutrinoen. Disse partikler er uhyre meget lettere end både resten af leptonerne og alle kvarkerne, og de har ingen elektrisk ladning.

Hvad med kræfterne? Der kender vi gravitationen, elektromagnetismen, den svage og den stærke kraft. De to første er nok de fleste bekendte med, de to sidste nok i mindre grad eller slet ikke – to ud af fire naturkræfter! Og det er to kræfter, der er helt forskellige fra dem, vi kender. Disse to kræfter er af hver sin grund rent kvantemekaniske fænomener. Man ser sjældent deres effekter i vor hverdag, hvis man da ikke lige går rundt i supermarkedet og spekulerer på, hvordan alt stoffet dog kan holde sammen på sig selv eller hvordan stjernerne egentligt pro-



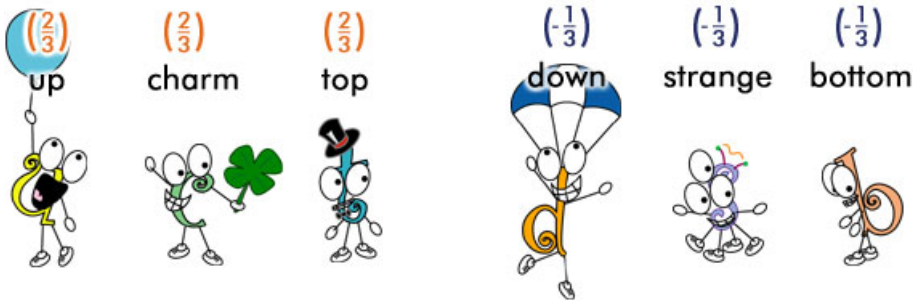
Figur 4.1: De fire naturkræfter.

ducerer energi. Hvis man ikke gør det, er det faktisk muligt at gå gennem hele livet uden nogensinde at opdage, at man er gået glip af en eventyrverden af magiske dimensioner, en verden med helt andre naturlove, der eksisterer lige under ens fødder. Men når man først har set den, bliver verden aldrig den samme igen.

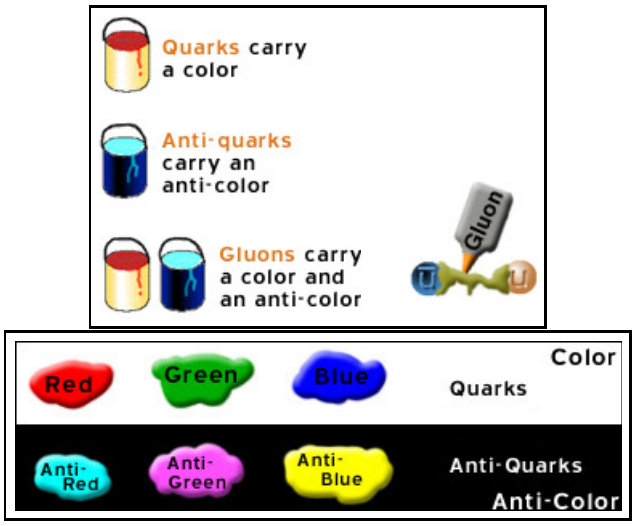
Den stærke kraft: Vi begynder med den stærke kraft. Som nævnt kan man undre sig over, hvordan stoffet egentligt holder sammen på sig selv. Rutherfords atom består jo af en positiv kerne omgivet af en negativ elektronsky, så det lyder fint nok, men idag ved vi jo, at kernen selv består af protoner og neutroner. De positive protoner frastøder hinanden, så hvad er det lige, der holder kernen sammen?

Det er naturligvis den stærke kraft. Den kaldes "stærk", fordi den kan overvinde de elektriske frastødningskræfter, der virker mellem protonerne i atomkernen, og det er endda kun en brøkdel af dens fulde styrke, der er på fære der. Går man *indeni* fx protonen, kommer den stærke kraft virkeligt til syne. Protonen er som sagt gjort af tre kvarker, og ligesom for atomkernerne er det den stærke kraft, der holder dem sammen. De er sat sammen på en sådan måde, at deres "stærke ladning" netop adderer op til nul, så protonen (med den stærke krafts øjne) er neutral udadtil. Indeni er protonen dog et yderst kompliceret stykke fysik. Ligesom elektromagnetisk stråling er sat sammen af lyskvanter, fotoner, er stærk stråling sat sammen af såkaldte gluoner.

Dette navn har de fået, fordi den stærke kraft mest af alt minder om en elastik i sin virkemåde. Hvis to af kvarkerne i protonen kommer for langt væk fra hinanden (mere end en femtometer), opstår der en slags elastik af gluoner mellem dem som tvinger dem sammen igen. Det er også derfor, man ikke kan se kvarker som frie partikler, de vil altid være låst inde i sammensatte partikler, kaldet hadroner, der er neutrale udadtil.



Figur 4.2: Kvarkerne. Hver slags eksisterer i tre forskellige udgaver, "rød", "grøn" og "blå". Se figuren på næste side.



Figur 4.3: Illustration af ideen om farver og antifarver.

Så man kan anskue den stærke kraft som virkelighedens fugemasse. Det er den, der holder sammen på tingene, i hvert fald kvarkerne og atomkernerne. At den opfører sig så anderledes end fx tyngdekraften og elektromagnetismen, der jo bliver svagere jo længere væk fra hinanden de vekselvirkende objekter er, skyldes, at gluonerne overhovedet ikke minder om fotoner. En foton, der udsendes, vil falde gennem rummet indtil den finder et ladet objekt, den kan vekselvirke med. Denne passive rolle er overhovedet ikke gluonernes stil. De bærer selv stærk ladning, svarende til, hvis fotoner kunne have elektrisk ladning. Dette betyder, at en udsendt gluon selv kan stråle videre, og de gluoner, den udsender kan igen stråle og så videre og så videre. Dette og så den vældige styrke af den stærke kraft gør gluonfeltet uhyre kompliceret at regne på.

Teorien om den stærke kraft hedder Kvantechromodynamik, i daglig tale QCD (*eng:* Quantum ChromoDynamics). Chromo'et betyder farve og kommer fra, at man kalder de stærke ladninger for "farver". Det kommer af, at der findes tre forskellige ladninger (i elektromagnetismen findes kun een: den elektriske ladning) og at reglerne for, hvordan feltet fra flere ladninger ser ud har meget tilfælles med, hvordan mennesket ser farver, nemlig som blandinger af tre grundfarver, der svarer til tre forskellige pigmenter i øjet. Men husk på, farverne er kun et trick til at hjælpe vore sind til at tænke på en intuitiv måde på chromodynamikkens ladninger. Kvarker og gluoner har ingen "farve" i vores normale forstand af ordet, fordi de er mindre end bølgelængden på synligt lys.

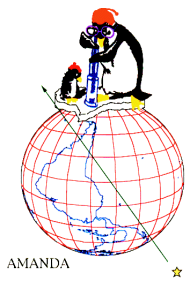
Den Svage Kraft: Den svage kraft er igen helt anderledes. Hvor hverken gluoner eller fotoner har nogen masse, er de såkaldte "W" og "Z" bosoner, som feltkvanterne for den svage kraft kaldes, uhyre tunge, næsten hundrede gange tungere end en proton og hundrede tusind gange tungere end en elektron. De blev først opdaget i begyndelsen af firserne på det fælleseuropæiske laboratorium CERN (Centre Européenne pour la Recherche Nucléaire) tæt ved Genève, simpelthen fordi man tidligere ikke havde haft energier nok i acceleratorerne til at skabe dem.

Det er denne kraft, der er ansvarlig for β-henfald (hvor en neutron bliver til en proton under udsendelse af en elektron og en antielektronneutrino). Indirekte er det også denne kraft, der gør, at Solen og stjernerne overhovedet kan skinne. De fusionsprocesser, der sker i deres indre, afhænger af, at to protoner (brint-kerner) kan omdannes til to neutroner, der kan finde sammen med to andre protoner og danne en Helium-kerne, hvorved der frigøres en betragtelig mængde energi, der stråles ud af Solen i form af neutrinoer og lys (fotoner).

W- og Z-bosonernes store masser gør, at den svage kraft er meget kortrækkende. For det første har partiklerne en meget meget kort levetid, omkring 0,00000000000000000000001 sekunder. Selv hvis man kunne accelerere dem op til tæt ved lysets hastighed, ville de ikke nå særligt langt. Også når man tager i betragtning, at relativitetsteorien siger, at tiden begynder at gå langsommere, jo hurtigere man bevæger sig. Laver man det relativistiske regnestykke viser det sig, at blot for at nå henover et enkelt atom, mens den er i live, skal sådan en fyr rejse ved 99% af lysets hastighed. Det er derfor, vi ikke mærker de svage kræfter i vores dagligdag. De når sjældent udenfor atomkernen.

Det er også derfor, neutrinoer er så svære at se. De vekselvirker kun med den svage kraft (og med tyngdekraften, men den er endnu svagere) og ville kunne trænge igennem flere lysår flydende brint uden så meget som at lægge mærke til, at det var der. Utrolige mængder neutrinoer skabes faktisk i Solen, så mange at der hvert sekund går flere miliarder neutrinoer gennem hver eneste kvadratcentimeter af Jordoverfladen (og gennem os).

De fleste går direkte gennem Jorden og ud på den anden side, men nogle få reagerer med den og bliver stoppet. Det største "neutrino-teleskop" i Verden, AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array), ligger på Sypolen (fordi den ligger fast i forhold til stjernerne), og der er planer om at bruge så meget som en kubik-kilometer af den antarktiske is som detektormateriale.



	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

Figur 4.4: Opsummering af de fire naturkræfter.

Kapitel 5

De Store Eksperimenter

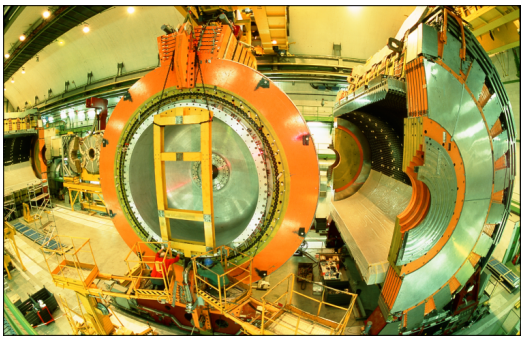
Hvor Lord Rutherford stort set ene mand splittede atomet, kræver den eksperimentelle højenergifysik idag så store resourcer og så omfattende forberedelser, at forskerne allierer sig i internationale kollaborationer på op til tusindvis af fysikere og teknikere per eksperiment. Energierne, der skabes, er så høje, at hvis man brændte en benzin-tank af og erstattede den energi, benzinen kemisk udvikler under forbrændingen, med den energi, der kan skabes i moderne partikel-acceleratorer (atom-smashers, som de hed i gamle dage), ville det svare til at fyre 10 millioner atombomber af på samme tid. Men i eksperimenterne bruges selvfølgeligt kun forsvindende små mængder stof ad gangen, det er kollisionerne af de enkelte partikler med hinanden, man vil studere.

Det, man udnytter, er i virkeligheden Einsteins konklusion om, at masse er en lokaliseret form for energi, $E = mc^2$. Ved at give to lette partikler ekstremt høje hastigheder og smadre dem ind i hinanden, kan man skabe tilstande og partikler, der formodentligt ikke har eksisteret siden de første brøkdele af et sekund efter Big Bang. Deres bevægelsesenergi kan laves om til "energi på masse-form" i et lille øjeblik, indtil den tunge tilstand, der som oftest er uhyre ustabil, henfalder til mere normale partikler, der kan ses i detektoren.

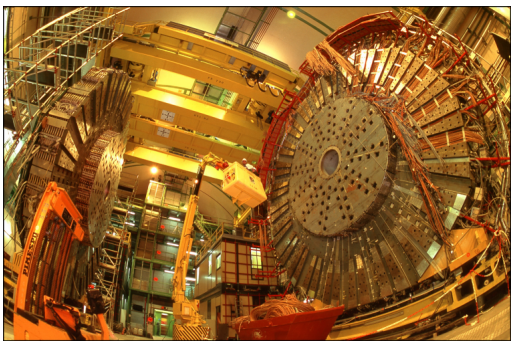
For at give et indtryk af, hvordan sådan nogle accelerator-baserede eksperimenter ser ud i virkeligheden, ses på næste side fire eksperimenter, der indtil for godt et år siden tog data ved Large Electron-Positron Collider (LEP, CERN). Billederne er taget sidste år, da man skilte detektorene ad efter påbegyndelsen af et nyt acceleratorprojekt. Så kan man bedre se, hvordan de så ud indeni.

Det er stadig en gammelkendt metode, der anvendes til at give partiklerne så høje energier. Man benytter simpelthen, at ladede partikler accelereres af elektriske felter, og ved at lave utroligt komplicerede mask-

ALEPH
(Apparatus for LEP PHysics)



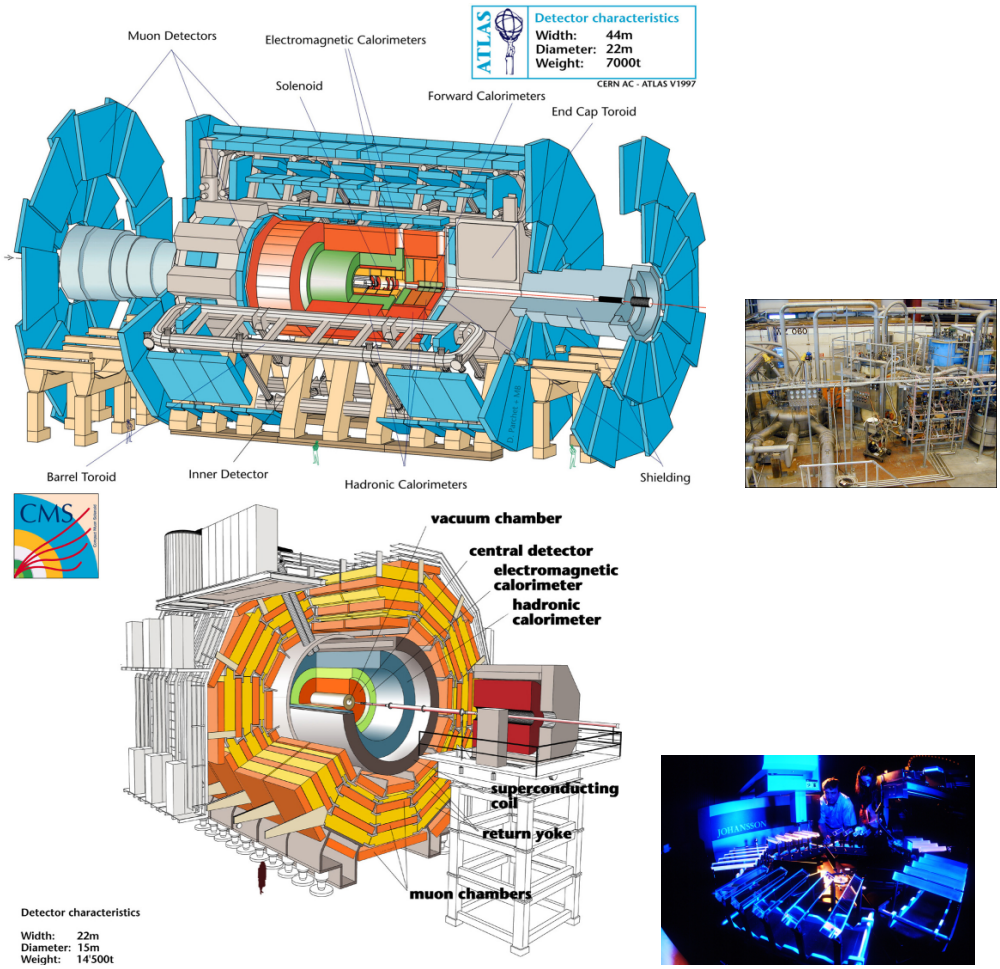
OPAL
(Omni Purpose Apparatus for LEP)



DELPHI
(Detector with Lepton, Photon, and Hadron Identification)

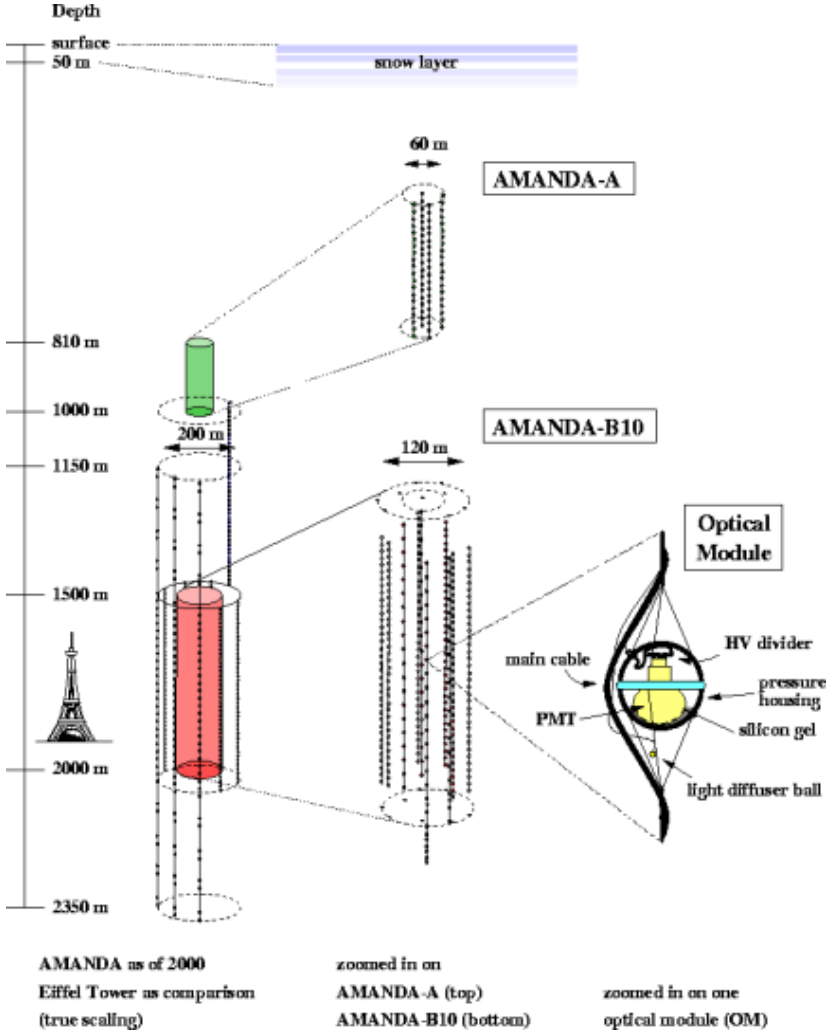
L3
(LEP point 3)

Figur 5.1: De fire detektorer, der indtil November 2001 tog data ved LEP acceleratoren. De stod i hver sit "pit" 140 meter under Jorden langs en ring, der har en omkreds på 27 kilometer. I centrum af hver af dem stødte højenergetiske elektroner og positroner sammen.



Figur 5.2: Øverst: ATLAS med kryogenisk test facilitet. Nederst: CMS med Wolframkrystaller. Bemærk de små menneskesilhouetter, der angiver målestoksforholdet.

iner kan det idag lykkes at accelerere protoner og antiprotoner op til en energi, der ville svare til at lade en elektron opleve et spændingsfald på 1000 miliarder Volt! Den næste accelerator, der er på tegnebrættet går op til 7000 miliarder Volt. Den hedder Large Hadron Collider (LHC) og skal ligge i den tunnel, der husede LEP-acceleratoren på CERN. Det var for at give plads til den, at man måtte lukke LEP-acceleratoren sidste år. Ovenfor ses skematiske tegninger af to af de detektorer, der skal bygges til LHC; ATLAS (**A** **T**oroidal **L**HC **A**pparatu**S**) og CMS (**C**ompact **M**uon **S**olenoid), samt eksempler på de tests, der i øjeblikket udføres på systemerne, der skal være klar i år 2007. Som eksempel på en ikke-accelerator-baseret detektor har vi allerede nævnt AMANDA på



Figur 5.3: AMANDA: Antarctic Muon And Neutrino Detector Array

Sydpolen. En skematisk tegning af den er vist på figur 5.3. Bemærk størrelsen af Eiffel-tårnet, der er vist i korrekt målestoksforhold til venstre i figuren.

På http://www.thep.lu.se/~zeiler findes links til bl.a. CERNs pressekontor og mange andre steder på nette, hvor man kan finde flere fotografier og tegninger.

Kapitel 6

Fremtidens Profeter

Hvad sker der i højenergifysikken for tiden? Hvad er det, vi gerne vil finde? Hvilke svar vil vi have?

- Nummer 1 på listen er Higgs-bosonen. Uden den forudsiger vore teorier, at intet skulle have masse, hvilket oplagt er sludder. Hvis vores teorier passer, derimod, skal Higgs-bosonen findes, og det snart. Den kan nemlig ikke have en vilkårlig masse, og vi har snart fået trængt den op i et meget lille hjørne, hvor de fleste dog stadig regner med, at den rent faktisk findes.

- Hvorfor har neutrinoer masser? Eksperimenter har i de senere år vist, at neutrinoerne er meget lette, men at deres masse ikke er nul, sådan som Standardmodellen siger. Flere teorier er på markedet, der kan forklare neutrinoernes masser, men de er meget svære at efterprøve, så mysteriet forbliver nok uopklaret et stykke tid ind i fremtiden.

- Er de fire naturkræfter aspekter af een og samme urkraft? Denne æstetisk umådeligt tiltalende ide har lokket mange fysikere, men den kan ikke være sand, hvis Standardmodellen passer. Der må være noget mere, men hvad? Og hvordan ser urkraften ud? Der er igen mange ideer på markedet, og de fleste af dem er igen forbistret svære at underkaste eksperimentets ildprøve.

- Sammenvævet med det foregående spørgsmål, kan man spørge hvorfor der lige netop er *seks* kvarker og *seks* leptoner. Hvorfor ikke fx to af hver? Hvorfor ikke 8? Faktisk ville ethvert multiplum af 2 kunne bruges. Vi har idag ingen forklaring på, hvorfor dette multiplum lige netop er 3.

- Hvad i alverden er mørkt stof? 90% af universet består af noget, vi ikke ved, hvad er. Forhåbentligvis skal vi ikke vente alt for længe på forklaringen til dette spørgsmål. Både satellit-baserede og Jordbaserede eksperimenter leder og leder. Indtil videre er intet fundet.

- Hvorfor er der så meget mere stof end antistof i universet? Forklaringen på dette hænger højst sandsynligt sammen med forklaringen på nogle af de andre spørgsmål, men om det er et af dem med kort tidsfrist eller lang kan vi ikke vide.

- Eksisterer der højere symmetrier i naturen som fx supersymmetri? Supersymmetri var noget, man begyndte at tale om for 30 år siden, og siden da er det blevet den bedste kandidat, man har, til en teori, der rækker ud over Standardmodellen, men som kunne være lige om hjørnet. Man har endda nogle forholdsvist gode argumenter for, at den måske endda *burde* være lige rundt om hjørnet. En væsentlig del af LHC projektet er fx at lede efter supersymmetri.

- Eksisterer der flere dimensioner end de 3 rumlige og den ene tidslige, vi lever vore liv i? Tanken er gammel men fik en renæssance for et par år siden, da det gik op for nogle teoretikere, at de ekstra dimensioner muligvis kunne være observerbare ved maskiner som LHC. Og hvis de eksisterer, hvordan ser de så ud? Er de krøllede eller nogenlunde flade, er der andre 4-dimensionale universer i dem parallelt med vores, eller er der måske universer med et helt andet antal dimensioner?

- En løsning til QCD – teorien om den stærke kraft. Dette er et fundamentalt spørgsmål i kvanteteorien, og der er blevet arbejdet på det længe. Man har opnået en god forståelse af, hvordan QCD opfører sig, men en egentlig løsning mangler stadig. Formodentligt på grund af det store antal udemærkede hjerner, der allerede *har* givet problemet det, de kunne, er det ikke et af de spørgsmål, der arbejdes mest på i øjeblikket.

- Findes der superstrenge? Den bedste kandidat til en forening af kvantemekanikken med relativitetsteorien er teorien om superstrenge, ifølge hvilken de elementære objekter i universet ikke er punktagtige partikler, men meget små strenge. Problemet med disse strenge er, at de skulle være så uhyre små, at man på det nærmeste skulle bygge acceleratorer så store som Solsystemer eller endda galakser for at kunne se dem. Hvorvidt vi får svaret på deres eksistens indenfor den nærmeste fremtid er højst tvivlsomt.

- Teorien om alting. Altid på listen. Bliver nok ved med at være der.
- ? – Det, vi ikke har tænkt over.

Mere information kan findes på:
– http://www.thep.lu.se/~zeiler
– http://ung.nbi.dk